

Быстрые реакторы с аксиальным размещением в активной зоне оксидного и металлического топлива

ТРОЯНОВ М. Ф., ИЛЮНИН В. Г., МАТВЕЕВ В. И., МУРОГОВ В. М., ПРОШКИН А. А., РУДНЕВА В. Я., ШМЕЛЕВ А. Н.

Для улучшения технико-экономических показателей быстрых реакторов-размножителей необходимо как усовершенствование конструкции реакторов с оксидным топливом, так и поиск новых технических решений, например, на основе использования других теплоносителей и перспективных видов топлива: карбидного, нитридного и металлического [1, 2]. Металлическое топливо, возможность использования которого рассматривалась с самого начала разработок быстрых реакторов (БР), в последнее время вновь привлекло внимание исследователей [3]. Как известно, металлическое топливо имеет некоторые преимущества перед керамическими видами топлива:

высокий коэффициент воспроизводства ($K_B = 1,7 \div 1,9$);

возможность создания реакторов с незначительным изменением реактивности в процессе кампании, что обеспечит благоприятное решение проблемы регулирования и увеличения непрерывной работы реактора без перегрузок (примерно до 1 года и более).

В то же время известно, что технологические свойства металлического ядерного топлива (в особенности содержащего плутоний) не позволяют в настоящее время ориентироваться на те же температурные параметры пароводяного цикла АЭС, какие дает оксидное топливо. В частности, это обусловлено сложностью обеспечения надежной работы твэлов при температуре $>650^\circ\text{C}$ и неудовлетворительной совместимостью этого топлива со сталью при температуре $>550^\circ\text{C}$ [4]. Если бы удалось использовать металлическое топливо, сохранив параметры пароводяного цикла, характерные для керамического топлива при достаточно глубоком выгорании ($\sim 5\%$ тяжелых атомов), то существенно увеличилось бы избыточное воспроизводство, что улучшило бы технико-экономические показатели АЭС с быстрыми реакторами. Решение этой проблемы может быть найдено (наряду с технологическими разработками новых сплавов и т. п.) на основе некоторых новых решений конструкции активной зоны быстрого реактора, создающих возможность эффективного использования в них металлического топлива.

Рассматривается, например, возможность использовать в быстром реакторе с оксидным топливом

природный или слабообогащенный уран с низким ($1-2\%$) уровнем накопления продуктов деления. Эта идея нашла свое воплощение в рамках так называемой гетерогенной концепции активной зоны быстрого реактора [5]. Концепция гетерогенной активной зоны облегчает решение проблем радиационной стойкости металлического топлива за счет значительного снижения требуемой глубины выгорания. Однако при этом на оболочке твэлов с металлическим топливом сохраняется температурный режим, характерный для оболочек твэлов с керамическим топливом, что в заметной мере обуславливает трудность реализации гетерогенной конструкции активной зоны быстрого реактора.

В настоящей работе представлены результаты исследования другой концепции, обеспечивающей возможность использования металлического топлива в активной зоне быстрого реактора при температурных условиях, близких к уже реализованным [6].

Рассматривается реактор, в котором со стороны входа «холодного» теплоносителя расположены твэлы с металлическим топливом. Относительно низкая температура теплоносителя в этой части реактора ($400-480^\circ\text{C}$) обуславливает благоприятные условия для работоспособности таких твэлов. В области, где теплоноситель имеет более высокую температуру ($500-560^\circ\text{C}$), расположены твэлы с оксидным топливом. При размещении металлического топлива в «низкотемпературной» области активной зоны, а оксидного — в «высокотемпературной» сохраняются температурные параметры чисто оксидного реактора и вместе с тем увеличивается полный коэффициент воспроизводства примерно на 0,15. Рост полного K_B обусловлен в основном увеличением внутреннего коэффициента воспроизводства активной зоны (K_{BA}), что важно не только с точки зрения темпа воспроизводства ядерного топлива, но и оптимизации режима работы быстрого реактора большой мощности с учетом изменения реактивности в процессе его непрерывной работы.

Практическая реализация указанной конструкции может быть различной. Можно представить себе единый твэл с различной топливной начинкой по высоте в общей оболочке. Другим вариантом может быть использование сборки с двумя решет-

Таблица 1

Характеристики реакторов с совместным использованием оксидного и металлического топлива

ками различных твэлов: с металлическим и оксидным топливом. В этом случае металлические и оксидные твэлы разделены прослойкой, содержащей стальные хвостовики твэлов и натрия.

С технологической точки зрения, по-видимому, наиболее прост вариант использования единого твэла с газовым контактным подслоем по аналогии с оксидным топливом. В варианте с использованием отдельных решеток оксидных и металлических твэлов металлические твэлы могут быть выполнены как с натриевым, так и с газовым подслоем. Применение натриевого контактного подслоя, хотя и более сложно выполнить технологически, обеспечивает возможность увеличения доли металлического топлива в активной зоне за счет повышения относительной высоты металлических твэлов. Кроме того, в твэлах с таким подслоем температура центра топлива может быть снижена до 650 °C и ниже, если это требуется. При раздельном размещении топлива по высоте ТВС возможно также оптимизировать параметры реактора путем варьирования параметров решеток твэлов, соотношения обогащения оксидного и металлического топлива и высоты твэлов.

На рис. 1 представлен один из вариантов расчетной модели БР с составной активной зоной. Расчеты проведены применительно к реактору БН-1600 с использованием многогрупповых ядерных констант БНАБ — 78 [7].

Ниже приведены исходные данные, положенные в основу ядерно-физических исследований и анализа показателей воспроизводства быстрых реакторов с совместным использованием оксидного и металлического топлива:

Тепловая мощность реактора, МВт	4200
Температура теплоносителя, °C:	
вход в реактор	354
выход из реактора	547
Плотность топлива в активной зоне, г/см ³ :	
оксидное	8,5
металлическое	13
Максимальная глубина выгорания топлива, % тяжелых атомов:	
оксидное	10
металлическое	15
Объемные доли материалов в активной зоне:	
топливо	0,45
конструкционные материалы	0,22
теплоноситель	0,33
Высота активной зоны, см	100

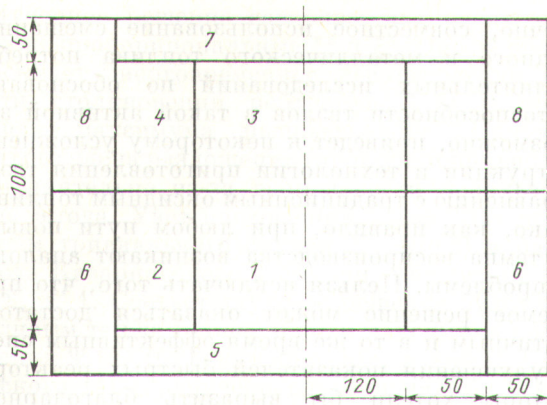
Было принято, что изотопный состав плутония соответствует составу плутония, накапливаемого в энергетических тепловых реакторах типа ВВЭР. Предполагалось, что нижняя решетка твэлов имеет торцовую экранную часть в виде металлического урана и активную часть с металлическим плутониевым или урановым топливом. В верхней решетке твэлов размещено оксидное топливо $PuO_2 - UO_2$, а в торцовой экранной части — UO_2 . Между решетками с различным топливом

Характеристика	Реактор типа БН-1600 с оксидным топливом	Реактор с оксидным и металлическим топливом	
		с единой решеткой твэлов	с раздельными решетками твэлов
Доля высоты активной зоны, занятая металлическим топливом	—	0,40	0,45
Радиальный коэффициент неравномерности	1,21	1,21	1,21
Аксиальный коэффициент неравномерности	1,23	1,28	1,31
Полный коэффициент воспроизводства (КВ)	1,37	1,53	1,49
Обогащение оксидного топлива ЗМО/ЗБО*, %	9,92/11,98	10,20/12,34	10,52/12,84
Обогащение металлического топлива ЗМО/ЗБО*, %	—	6,19/7,49	6,54/8,00
Удельное избыточное воспроизводство топлива, кг/(МВт (эл.)·год)	0,284	0,410	0,377
Удельная загрузка реактора, кг/МВт (эл.)	1,99	2,13	2,25
Соотношение относительной скорости накопления продуктов деления в металлическом и оксидном топливе	—	0,49	0,50
Потери реактивности за 120 сут, $\Delta k_{эф}/k_{эф}$	0,0195	0,0085	0,0095
Доля общей мощности, приходящаяся на металлическое топливо	—	0,38	0,43
Максимальная температура металлического топлива, °C	—	730	650
К. п. д. АЭС (нетто), %	38	38	38
Время удвоения, отн. ед.	1,00	0,73	0,85

* ЗМО, ЗБО — зоны малого и большого обогащения.

могут быть размещены внутренние аксиальные прослойки, содержащие твэлы с сырьевым материалом, керамическим или металлическим.

По своей физической сущности такая модель активной зоны быстрого реактора представляет один из возможных вариантов активной зоны



Р и с. 1. Расчетная модель реактора с составной активной зоной: 1, 2 — металлические активные зоны малого и большого обогащения; 3, 4 — оксидные активные зоны малого и большого обогащения; 5, 7 — нижний металлический и верхний оксидный торцовые экраны; 6, 8 — металлическая и оксидная части бокового экрана (размеры в см)

с аксиальной гетерогенностью. При этом в отличие от обычно рассматриваемой гетерогенности создаются более благоприятные теплотехнические условия для использования металлического топлива, что позволяет существенно увеличить долю мощности, выделяемую в металлической подзоне.

Некоторые результаты расчетного исследования приведены в табл. 1. Можно видеть, что в реакторе с совместным использованием оксидного и металлического топлива с параметрами, близкими к оптимальным по темпу воспроизводства топлива, оксидная подзона имеет повышенное обогащение и пониженный собственный коэффициент воспроизводства. Однако это снижение собственного темпа воспроизводства с избытком компенсируется ростом воспроизводства в металлической подзоне с пониженным обогащением.

Исследования указывают на наличие некоторого предпочтительного значения обогащения металлического топлива с точки зрения воспроизводства в реакторе в целом. При снижении этого значения в подзоне с металлическим топливом снижается плотность тепловыделения, что позволяет увеличить долю высоты ТВС, приходящуюся на топливо. Но в случае сохранения высоты ТВС и ее полной мощности увеличение высоты менее напряженной металлической части приводит к необходимости повышения плотности тепловыделения в оксидной части ТВС. Этот процесс ограничен предельными температурами топливного сердечника оксидного твэла. В то же время при увеличении обогащения в металлической подзоне происходит относительный рост температуры и снижение допустимой высоты металлической подзоны. При этом снижается темп воспроизводства в металлической подзоне.

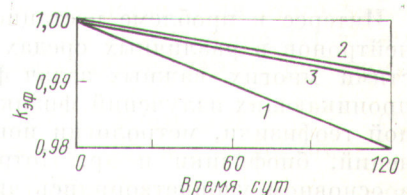
Высокообогащенная подзона с оксидным топливом в значительной мере играет роль «запальной»

подзоны. В результате, несмотря на относительно низкую глубину выгорания топлива металлической подзоны (4—5% тяжелых атомов), доля выгорающей начальной загрузки в ней достаточно высока. Соответствующее выгорание оксидного топлива составляет 8—10% тяжелых атомов при едином времени облучения составной ТВС ~1,5 года. Отметим, что повышение средней глубины выгорания металлического топлива свыше 5% тяжелых атомов не приводит к значительному росту темпа воспроизводства ядерного топлива.

Более высокий собственный темп воспроизводства в металлической подзоне при доле мощности в ней ~40% и достаточно высокой доле выгорания первоначальной загрузки обеспечивает суммарный темп воспроизводства в составной активной зоне, примерно в 1,25 раза больший по сравнению с темпом воспроизводства в оксидном реакторе при прочих равных условиях.

Существенным фактором является также рост внутреннего коэффициента воспроизводства активной зоны с совместным использованием оксидного и металлического топлива. В рассматриваемых моделях активной зоны с оксидным и металлическим топливом КВА имеет значение, немного превышающее единицу. Это обуславливает, в частности, значительно меньшее по сравнению с оксидным вариантом изменение реактивности в процессе работы реактора и позволяет при неизменной мощности СУЗ существенно увеличить время между перегрузками и, следовательно, увеличить коэффициент нагрузки АЭС, что очень важно экономически [8] и с точки зрения улучшения эксплуатации, а также надежности работы реактора. Изменение $k_{эф}$ со временем при работе реактора показано на рис. 2.

Необходимо отметить, что при использовании в «металлической» подзоне активной зоны не смешанного уран-плутониевого топлива, а обогащенного урана металлического урана также существенно улучшается изменение реактивности между перегрузками по сравнению с таким же изменением в активной зоне реактора с чисто оксидным смешанным топливом. Возможен также и промежуточный вариант, когда металлическое топливо наряду с ^{235}U содержит и некоторое количество плутония.



Р и с. 2. Изменение реактивности в процессе работы быстрого реактора с совместным использованием оксидного и металлического топлива: 1 — реактор типа БН-1600 с оксидным топливом; 2 — реактор с совместным использованием оксидного ($\text{U} + \text{Pu}$) O_2 и металлического $\text{U} + \text{Pu}$ -топлива (доля высоты металлической подзоны 40%); 3 — реактор с совместным использованием оксидного ($\text{U} + \text{Pu}$) O_2 и металлического уранового топлива (доля высоты металлической подзоны 50%)

Таблица 2

Удельное производство избыточного топлива из системы быстрых реакторов (коэффициент нагрузки $\varphi = 0,8$)

$\omega_{ЯЭ}$	$r_b - \omega_{ЯЭ} g_b$, кг/[МВт (эл.) · год]	
	Реактор с оксидным топливом	Реактор с единой решеткой ТВЭЛов с оксидно-металлическим топливом
0,01	0,258	0,382
0,05	0,151	0,268
0,10	0,018	0,127
0,12	*	0,070
0,14	*	0,013

* Режим самообеспечения топливом в ЯЭ невозможен.

При рассмотрении работы БР в ядерной энергетике (ЯЭ), включающей реакторы различного типа, в качестве показателя оптимальности БР по воспроизводству может служить удельное годовое производство избыточного вторичного топлива из БР [9, 10]:

$$r_b - \omega_{ЯЭ} g_b,$$

где r_b — удельное годовое производство избыточного вторичного топлива в БР, кг/[МВт(эл.) · год]; g_b — удельная загрузка топлива в топливный цикл БР, кг/МВт(эл.); $\omega_{ЯЭ}$ — годовой темп развития ЯЭ, год⁻¹ (табл. 2). Из этой таблицы следует, что БР с совместным использованием оксидного и металлического топлива, имеющие повышенную удельную загрузку и повышенный коэффициент воспроизводства по сравнению с БР на оксидном топливе, обеспечивают более высокий темп развития всей ЯЭ, сбалансированной по топливу.

Конечно, совместное использование смешанного оксидного и металлического топлива потребует дополнительных исследований по обоснованию работоспособности ТВЭЛов в такой активной зоне и, возможно, приведет к некоторому усложнению конструкции и технологии приготовления ТВЭЛов по сравнению с традиционным оксидным топливом. Однако, как правило, при любом пути повышения темпа воспроизводства возникают аналогичные проблемы. Нельзя исключать того, что предлагаемое решение может оказаться достаточно практичным и в то же время эффективным способом улучшения показателей быстрых реакторов.

Авторы хотели бы выразить благодарность Л. А. Кочеткову, Э. А. Стумбуру, В. Е. Колесову, В. А. Апсэ, А. И. Зинину, Л. В. Точену за полезные обсуждения в процессе выполнения этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейпунский А. И. и др. IV Женевск. конф. 1971. Докл. СССР № 709.
2. Орлов В. В. и др. В кн.: Труды II Симп. СЭВ «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Обнинск, изд. ФЭИ, 1975, т. 3, с. 168.
3. Lam P., Barthold W. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1977, v. 27, p. 753.
4. Kittel J. e.a. «Nucl. Engng Design», 1971, v. 15, p. 373.
5. Воронаев А. И. «Атомная техника за рубежом», 1979, № 11, с. 3.
6. Илюнин В. Г. и др. [2], с. 37.
7. Абаган Л. П. и др. «Атомная энергия», 1980, т. 48, вып. 2, с. 110.
8. Кириллов Е. В. [2], 1975, т. 1, с. 79.
9. Орлов В. В., Шарапов В. Н., Галанин А. Н. В кн.: Опыт эксплуатации АЭС и пути дальнейшего развития ядерной энергетики. Обнинск, изд. ФЭИ, 1974, т. 1, с. 251.
10. Илюнин В. Г. и др. Препринт ФЭИ-1036. Обнинск, 1980.

Поступила в Редакцию 03.06.80

УДК 539.125.523.5

Теория нестационарного замедления нейтронов в тяжелой среде с произвольными сечениями рассеяния и захвата

ПОДОСЕНОВ С. А., ТРУХАНОВ Г. Я.

Интерес к проблеме нестационарного переноса нейтронов в различных средах вызван потребностями многих важных задач физики защиты от проникающих излучений, физики реакторов, ядерной геофизики, метрологии ионизирующих излучений, биофизики и др. Потребности практики в основном удовлетворялись численными методами. Одновременно делались неоднократные попытки решить соответствующее кинетическое уравнение аналитически (см. работы [1—4] и библиографию к ним). Тем не менее до настоящего времени не было найдено аналитического решения

кинетического уравнения в явном виде даже для бесконечной однородной тяжелой среды с равномерно распределенным по пространству источником при произвольных энергетических зависимостях сечения рассеяния $\Sigma_s(E)$ и захвата $\Sigma_c(E)$. Наиболее существенные шаги в этом направлении, на наш взгляд, сделаны в работах [1, 3]. В работе М. В. Казарновского [1] приближенное решение соответствующего кинетического уравнения при $\Sigma_c = 0$ и произвольном $\Sigma_s(v)$ было найдено в виде ряда по степеням величины $\xi = [\bar{v}(\tau) - v]/v$, где $\bar{v}(\tau)$ — средняя скорость нейтронов в момент τ .